

STUDI ANALISIS STABILITAS LERENG PADA TIMBUNAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Garup Lambang Goro

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang

Abstract

One of many causes of slope failure on fill is earthquake. Many seismic slope stability methods are used for slope stability design, but every method had advantages and disadvantages. One of the simple and common methods is Static Equivalent Analysis in which transient earthquake acceleration is made equivalent to a uniform horizontal force. Besides there is no representative earthquake characteristics are modeled, limitation of this method is a difficulty in assigning an appropriate seismic reduction factor. It is considered that the more realistic method is Dynamic Analysis using finite element method, which apply input motion as seismic load. The advantage of the method, which in this case by using Geo-Office computer program is it can produces minimum safety factor along the impact duration of earthquake. This study compares between Static Equivalent Analysis and Dynamic Analysis on a fill model on Hard Site Classification S_C , Medium/ Stiff Site Classification S_D and Soft Site Classification S_E following the site classification according to (Uniform Building Code) UBC, 1997. Depths of based rock are assumed at 30m and 100m. Earthquake mechanisms of input motion that are applied at base rock are subduction and strike-slip, with peak-based acceleration vary from 0,1g to 0,4g. The research also determines a reduction factor (f_R) on fill model that can be used for Static Equivalent Analysis in order to produce safety factor that is similar to minimum dynamic safety factor. In this research, Static Equivalent Analysis is conducted by using a computer program Plaxis whereas Dynamic Analysis is conducted by computer program Geo-Office. The research results show that static equivalent safety factor is always lower than dynamic minimum safety factor or it can be said that Static Equivalent Analysis is more conservative than Dynamic Analysis. By Peak Based Acceleration 0,2g on strike-slip mechanism, the seismic reduction factor (f_R) for fill case over Hard Site is about 0,62, for Medium Site case, f_R is about 0,2 and on the fill over Soft Site had f_R is about 0,18.

Keywords: *static equivalent analysis, dynamic analysis, fill, seismic reduction factor, finite element method*

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan empat lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Australia, lempeng Asia, lempeng Pasifik dan lempeng laut Filipina. Interaksi antara keempat lempeng utama tersebut menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang memiliki aktivitas seismik cukup tinggi dan rawan terhadap bahaya gempa. Hal ini ditunjukkan oleh data-data pencatatan kejadian gempa di Indonesia, yaitu lebih dari 8000 kejadian tercatat gempa dengan $M_s \geq 5$ dari tahun 1897 sampai tahun 2000, bahkan pada akhir tahun 2004 telah terjadi gempa dengan kekuatan 8,9 skala Richter yang menyebabkan Tsunami di Aceh dan Sumatera Utara yang menelan korban lebih dari 150.000 jiwa.

Perencanaan bangunan timbunan tahan gempa di Indonesia masih banyak menggunakan cara statik ekuivalen. Pada metode ini efek beban dinamik yang ditimbulkan gempa bumi diubah menjadi beban statik. Cara ini mempunyai beberapa keterbatasan (Najoan, Th. F., 1991), yaitu:

- a. Koefisien seismik diambil dari percepatan gempa maksimum yang bekerja di permukaan tanah dibagi dengan gravitasi. Jadi tubuh timbunan dianggap sebagai kesatuan yang kaku (*rigid body*) yang sebenarnya tidak demikian kondisinya.
- b. Arah gaya gempa dianggap kearah luar lereng yang meningkatkan gaya longsor. Sebenarnya gaya gempa yang bekerja bersifat *transient* artinya arah gaya bergantian ke luar dan masuk

lereng sesuai riwayat percepatan gempa.

- c. Perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan cara keseimbangan batas, dimana tegangan, regangan dan alihan permanen dari suatu lereng yang longsor tidak dapat diperoleh.

Untuk mengatasi kelemahan cara statik ekuivalen, dalam perencanaan perlu diperiksa keamanannya dengan Analisis Dinamik dengan Metode Elemen Hingga.

Penelitian ini mengkaji ulang Analisis statik ekuivalen terhadap Analisis dinamik pada konstruksi timbunan, menggunakan Metode Elemen Hingga dengan bantuan program komputer *Plaxis* dan *Geo-Office*. Dalam penelitian ini juga dilakukan studi untuk melihat pengaruh parameter-parameter variabel terhadap angka keamanan longsor pada lereng timbunan akibat gempa. Parameter-parameter variabel itu diantaranya:

- a. klasifikasi tanah yang didasarkan pada kecepatan gelombang geser rata-rata,
- b. kandungan frekwensi (karakteristik) *input motion*,
- c. percepatan gempa maksimum di batuan dasar (PBA: *Peak Base Acceleration*),

Hasil yang diharapkan dari studi ini adalah memberikan hubungan angka keamanan minimum dari Analisis Dinamik (SF-Dinamik Minimum) terhadap angka keamanan dari Analisis Statik Ekuivalen (SF Statik Ekuivalen), mendapatkan Faktor Reduksi Gempa (f_R) untuk Analisis Statik Ekuivalen yang dapat direkomendasikan guna mendapatkan Angka Keamanan yang sama dengan Angka Keamanan Dinamik Minimum.

Pembatasan masalah diperlukan karena banyaknya permasalahan dalam suatu analisis. Pada penelitian ini diberikan batasan sebagai berikut:

- a. Analisis dilakukan pada timbunan diatas lapisan tanah keras, sedang dan lunak (S_C , S_D , S_E) dimana divariasikan berdasarkan klasifikasi tanah menurut *Uniform Building Code* (UBC, 1997)

- b. Analisis dilakukan pada model dengan kedalaman batuan dasar (D) 30m dan 100m
- c. *Input motion* yang digunakan adalah *input motion* sintetik gempa *Subduction* dan *Strike-Slip*, dimana masing-masing *input motion* mempunyai kandungan frekwensi yang berbeda.
- d. Percepatan gempa maksimum pada batuan dasar (PBA) ditinjau pada percepatan 0,10 g, 0,20 g, 0,30 g dan 0,4 g
- e. Metode yang digunakan adalah Metode Elemen Hingga 2D dengan bantuan program komputer *Plaxis* dan *Geo-Office*.

Beban gempa dapat berpengaruh signifikan terhadap tegangan-tegangan dinamik horisontal dan vertikal pada lereng. Tegangan-tegangan tersebut menghasilkan tegangan normal dinamik dan tegangan geser sepanjang daerah yang berpotensi longsor. Jika dibandingkan dengan tegangan geser statik yang ada, tegangan-tegangan dinamik dapat melampaui tahanan geser ijin tanah. Hal ini yang menyebabkan ketidakstabilan lereng.

METODOLOGI PENELITIAN

Hasil perhitungan stabilitas lereng pada timbunan akibat beban gempa sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya adalah: kelas tanah, kedalaman batuan dasar, tinggi timbunan/ kedalaman galian, kemiringan lereng, input motion dan percepatan pada batuan dasar. Dalam studi ini beberapa parameter diambil sebagai parameter variabel sedangkan parameter lainnya dianggap sebagai parameter tetap.

Studi ini akan membandingkan dan mencari hubungan angka keamanan lereng dengan menggunakan Analisis Statik Ekuivalen dan Analisis dinamik. Pada studi-studi sebelumnya, hasil Analisis Dinamik pada bangunan timbunan adalah alihan tetap yang terjadi, angka keamanan lereng pada akhir gempa. Dengan menggunakan program *Quake/W* dan *Slope/W* (*Geo-Slope Office*) dapat dihasilkan angka keamanan selama

berlangsungnya gempa sehingga dapat diambil nilai terkecilnya (SF-dinamik minimum).

Parameter dan Propertis Dinamik Tanah

Analisis akan dilakukan pada kasus timbunan dengan material. tanah di variasikan pada tiga

kelas tanah (S_C , S_D dan S_E) berdasarkan kecepatan gelombang geser rata-rata tanah yang mengacu pada *Uniform Building Code* (UBC), 1997, dengan kriteria sebagai berikut (Tabel 1)

Tabel 1. Propertis Dinamik Tanah menurut UBC 1997 (Kramer, S.L., 1996)

Golongan	Jenis Tanah	Kriteria		
		Vs (m/ dt)	N _(SPT)	Cu (kPa)
S _A	Batuan Keras	> 1500		
S _B	Batuan	760 - 1500		
S _C	Tanah sangat padat/ batuan lunak	360 - 760	> 50	> 100
S _D	Lempung kaku	180 - 360	15 - 50	50 - 400
S _E	Lempung lunak	< 180		< 50
S _F	Mensyaratkan khusus evaluasi	Tanah liquefiable, sangat sensitif, gambut, lempung plastisitas sangat tinggi (PI> 75), lempung lunak medium yang sangat tebal (> 36 m)		

Model material yang digunakan pada analisa dinamik dengan *Quake/W* adalah model *Equivalent Linear*, dimana pada model ini parameter masukannya antara lain: Modulus Geser (G), *poisson ratio* n dan *damping ratio*. Sedangkan pada perhitungan stabilitas lereng dengan *Slope/W* menggunakan metode tegangan elemen hingga (*stress finite element*) yang didasarkan pada persamaan keseimbangan batas dengan model tanah Mohr-Coulomb. (Microsoft Corp., 1991)

Pada Analisis Statik Ekuivalen digunakan bantuan program *Plaxis* dengan menggunakan model material Mohr-Coulomb dan angka keamanan dihitung dengan metode *c/phi reduction*. (Brinkgreve, R.B.J et. Al, 1998)

Hubungan Modulus Elastisitas (E) , Modulus Geser (G) dan Kecepatan Gelombang Tekan (V_p) dan Kecepatan Gelombang Geser (Vs) adalah: (Dakoulas, P. et.Al, 1998)

$$V_p = \sqrt{\frac{Eoed}{r}}$$

$$Eoed = \frac{(1 - n)E}{(1 + n)(1 - 2n)}$$

$$r = \frac{g}{g}$$

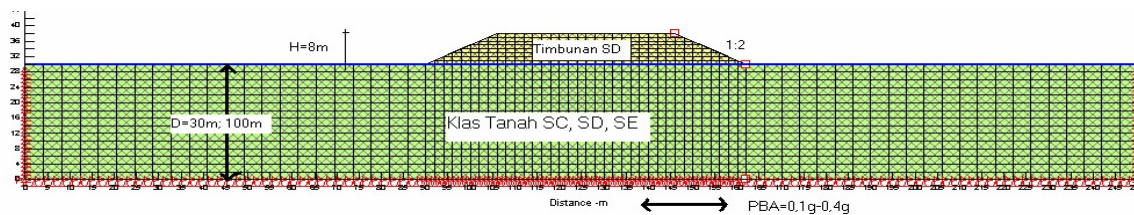
Dimana:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{r}}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + n)}$$

g = berat isi total dan g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

Studi ini dilakukan pada sebuah model timbunan dengan kedalaman batuan dasar 30m dan 100m, tanah dianggap homogen sampai pada kedalaman batuan dasar. Tinggi timbunan adalah 8m. Lebar atas timbunan 40 m, kemiringan lereng 1:2. Berat volume tanah untuk tanah keras, 18 KN/m³, tanah sedang, 16 KN/m³, dan tanah lunak 14 KN/m³. Tanah timbunan dianggap tanah sedang, S_D dengan berat volume 16 KN/m³; Cu= 60 kPa dan j =5°. Nilai Poisson Ratio n, diambil nilai 0,35 untuk semua jenis tanah.



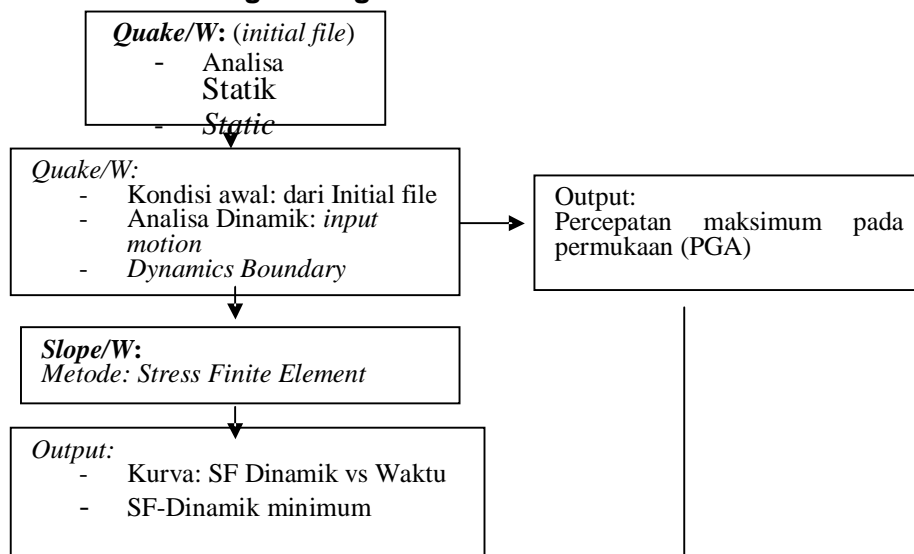
Gambar 1. Pemodelan untuk timbunan

Tabel 2. Propertis Tanah

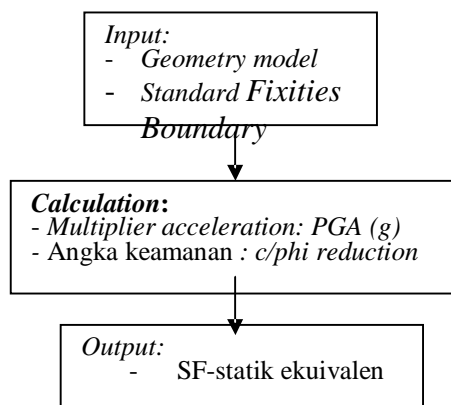
Jenis Tanah	E (KN/m ²)	G (KN/m ²)	Vs (m/dtk)	Vs (m/dtk) UBC, 1997
Tanah Keras, S _C	1.5536E+6	575412.84	560	360 - 760
Tanah Sedang, S _D	3.2103E+5	118899.08	270	180 - 360
Tanah Lunak, S _E	98642	36534.15	160	< 180
Jenis Tanah	Cu (KN/m ²)	j (°)	PI	Cu (KN/m ²) UBC, 1997
Tanah Keras, S _C	110	1	5	> 100
Tanah Sedang, S _D	60	1	15	50 - 100
Tanah Lunak, S _E	30	1	40	< 50

Diagram Alir Metodologi Penelitian:

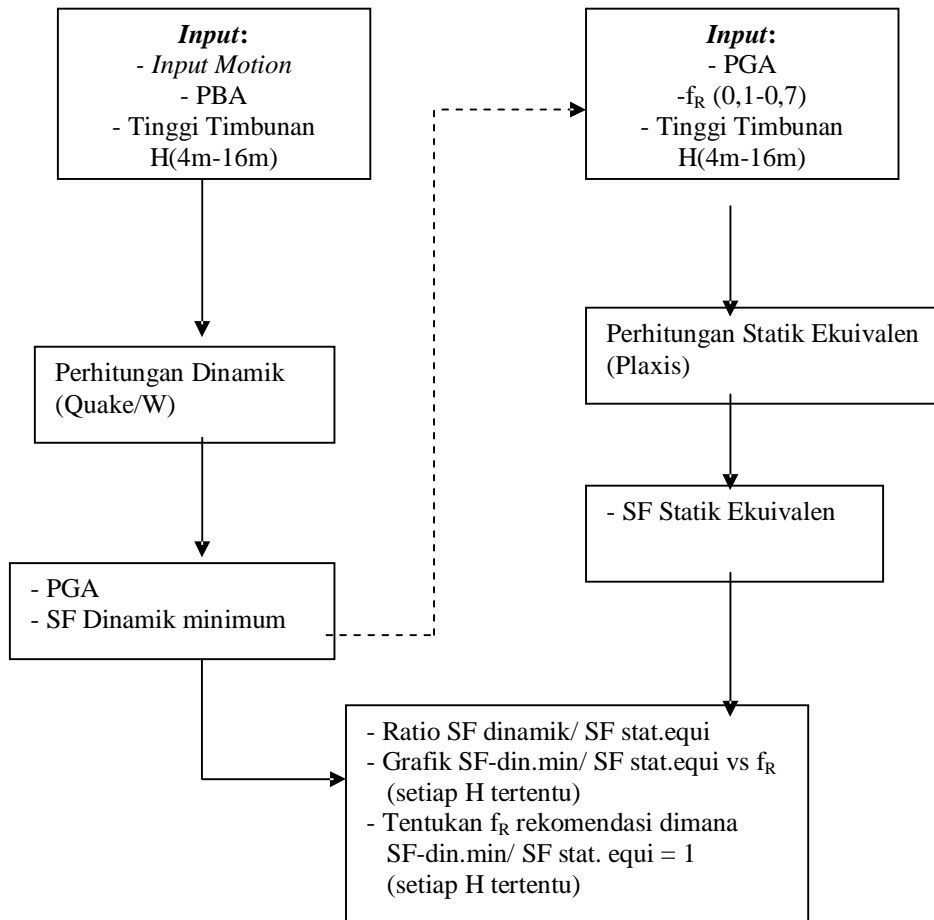
A. Analisis Dinamik dengan Program Geo-Office



B. Analisis Statik Ekuivalen dengan Plaxis



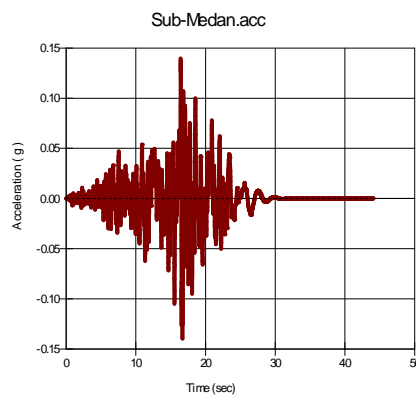
C. Menentukan Faktor Reduksi Gempa (f_R) untuk Analisa Statik Ekuivalen pada Kasus Timbunan dengan berbagai Tinggi Timbunan (H)



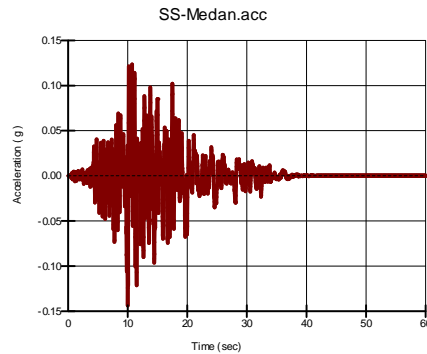
Data Gempa

Pada studi ini *input motion* yang digunakan adalah input motion sintetik gempa *Subduction Medan* (Gambar 2.: percepatan puncak 137 cm/detik² pada 16,42 detik, durasi gempa 43,99 detik) dan *Strike-Slip Medan* (Gambar

3.: percepatan puncak 141 cm/detik² pada 10 detik, durasi gempa 60 detik) yang didapatkan dari keluaran program EZ-FRISK masing-masing untuk periode ulang 500 tahun. (Hendarto, 2005)



Gambar 2. Scaled Recorded Ground Motion Subduction Medan, dengan percepatan puncak 137 cm/detik² pada 16,42 detik, durasi gempa 43,99 detik.



Gambar 3. Scaled Recorded Ground Motion Strike-Slip Medan, dengan percepatan puncak 141 cm/detik² pada 10 detik, durasi gempa 60 detik.

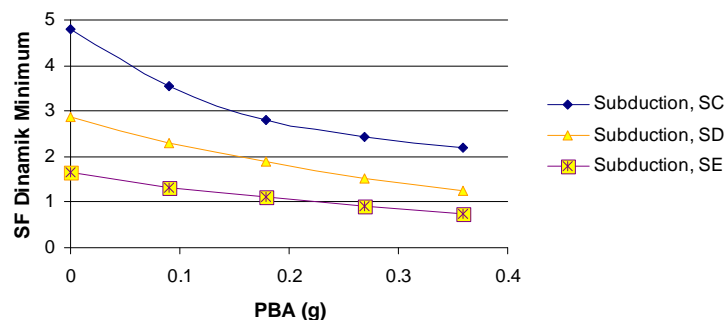
Parameter dan Propertis Tanah untuk Analisa Statik Ekuivalen

Dalam analisa statik ekuivalen, sebagai data masukan adalah percepatan gempa pada permukaan tanah (PGA) sebagai beban percepatan horisontal. Agar dapat dibandingkan dengan Analisa Dinamik, maka PGA diambil dari hasil Analisa Dinamik pada masing-masing kasus. Properti tanah yang digunakan adalah Modulus Elastisitas (E), berat volume, poisson ratio, kohesi dan sudut

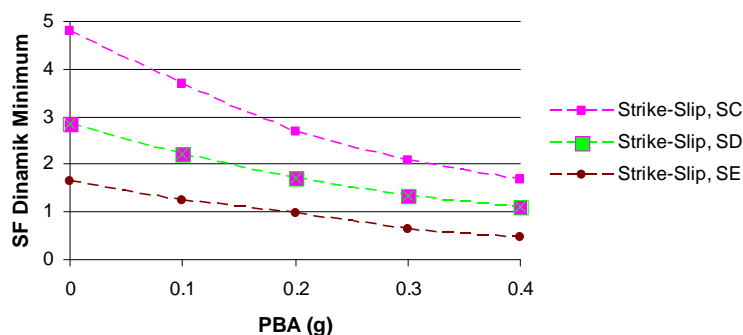
geser dalam seperti pada analisa dinamik. Perhitungan dibantu dengan program komputer PLAXIS, menggunakan model tanah Mohr-Coulomb.

HASIL

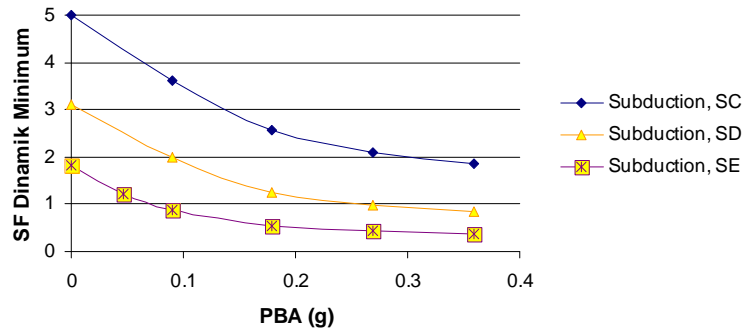
Dari hasil Analisis Dinamik tampak bahwa SF-Dinamik minimum menurun dengan naiknya PBA, baik input motion-nya *subduction* maupun *strike-slip* (Gambar 4 sampai dengan Gambar 7).



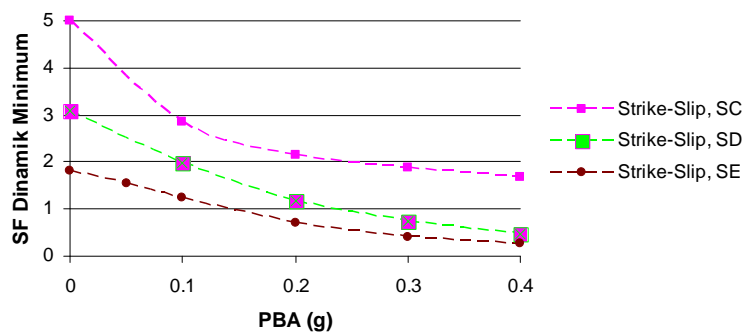
Gambar 4. Hubungan SF Dinamik minimum terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Subduction* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=30m



Gambar 5. Hubungan SF Dinamik minimum terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Strike-Slip* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=30m



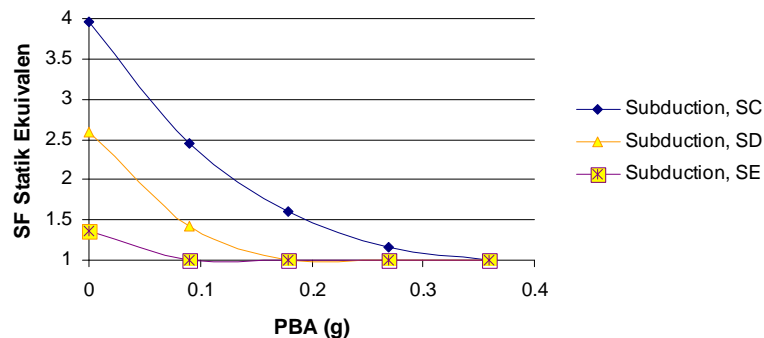
Gambar 6. Hubungan SF Dinamik minimum terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Subduction* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=100m



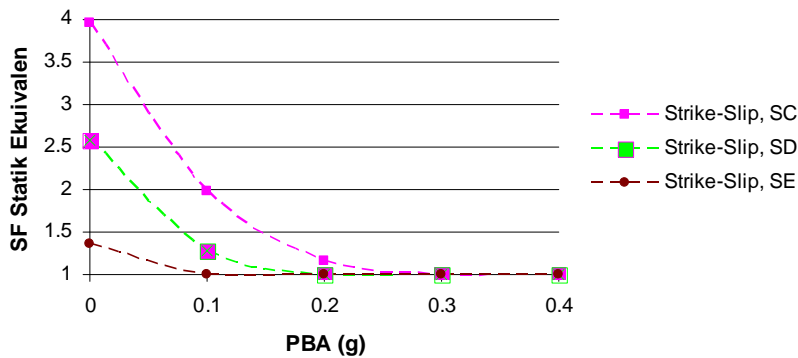
Gambar 7. Hubungan SF Dinamik minimum terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Strike-Slip* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=100m

Hasil Analisis Statik Ekuivalen juga menunjukkan bahwa angka keamanan menurun dengan naiknya PBA, mekanisme gempa tidak banyak berpengaruh terhadap

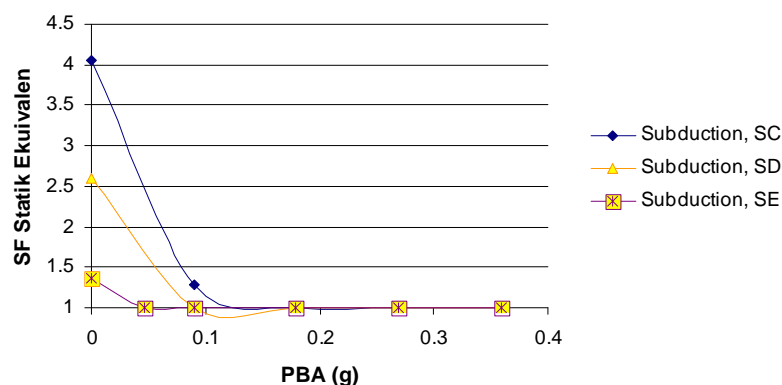
angka keamanan, sedangkan kedalaman batuan dasar (D) sangat berpengaruh dengan besarnya angka keamanan (Gambar 8 sampai dengan Gambar 11).



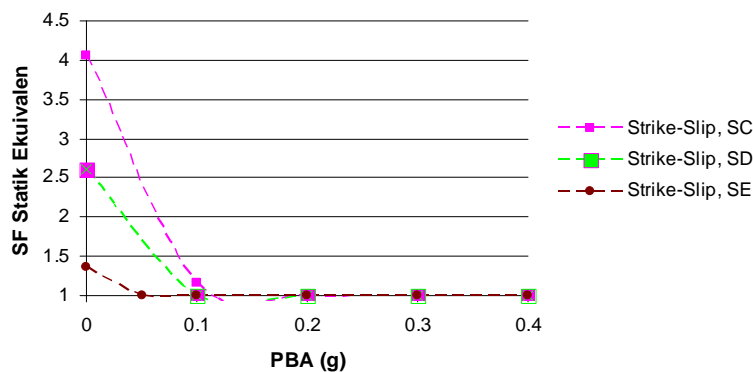
Gambar 8. Hubungan SF-statik ekuivalen terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Subduction* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=30m



Gambar 9. Hubungan SF-statik ekuivalen terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Strike-Slip* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=30m



Gambar 10. Grafik Hubungan SF-statik ekuivalen terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Subduction* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=100m



Gambar 11. Grafik Hubungan SF-statik ekuivalen terhadap PBA untuk Tanah Lunak, Sedang dan Keras dengan input motion *Strike-Slip* pada pemodelan timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=100m

Untuk mengetahui pengaruh tinggi timbunan terhadap SF-dinamik minimum dan SF-statik ekuivalen, dilakukan simulasi pada salah satu kasus dengan menambahkan tinggi timbunan. Perhitungan dilakukan pada kasus timbunan dengan kedalaman batuan dasar D=30m; pada Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak;

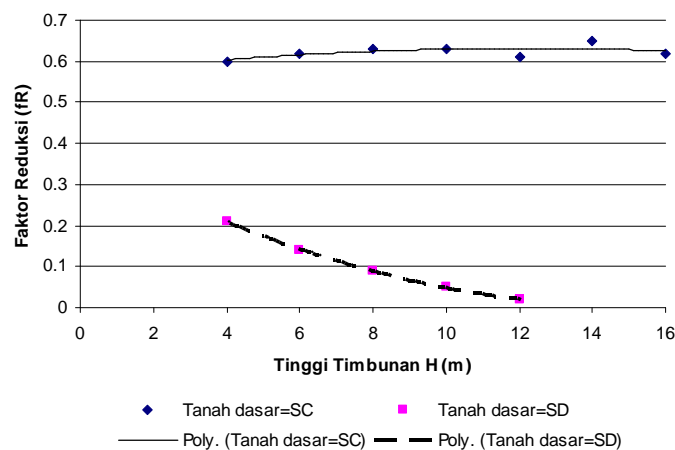
input motion *strike-slip* dengan PBA 0,2g. Tinggi timbunan (H) disimulasikan 4m-16m.

Penentuan Faktor Reduksi Gempa dilakukan dengan cara memasukkan beberapa faktor reduksi f_R (0,1 – 0,7), kemudian dilakukan Analisis Statik Ekuivalen pada model yang

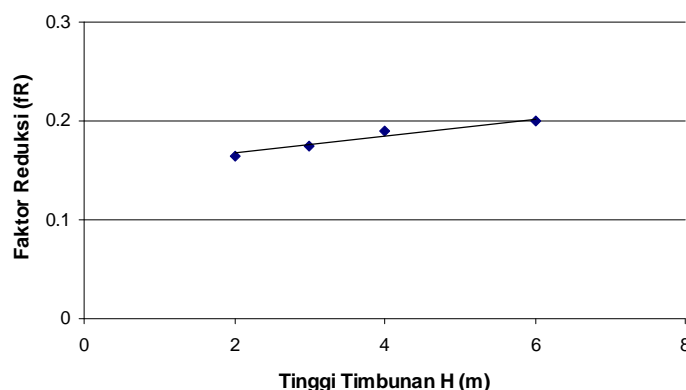
telah dilakukan diatas. Faktor Reduksi Gempa (f_R) yang direkomendasikan adalah pada nilai ratio SF-statik ekuivalen/ SF-dinamik minimum = 1.

Hasilnya menunjukkan bahwa pada setiap tinggi timbunan yang berbeda memiliki faktor reduksi rekomendasi yang berbeda pula. Untuk timbunan diatas Tanah

Keras,direkomendasikan menggunakan Faktor reduksi f_R antara 0,65 – 0,6 untuk tinggi timbunan $H=4\text{m}$ – 16m . Sedangkan timbunan diatas Tanah Sedang, S_D , f_R berkisar 0,21 – 0,1 untuk tinggi timbunan $H=4\text{m}$ – 8m . (Gambar 12). Pada timbunan diatas Tanah Lunak S_E , menghasilkan f_R antara 0,165 – 0,2 untuk tinggi timbunan $H=2\text{m}$ – 6m . (Gambar 13).



Gambar 12. Hubungan Tinggi Timbunan terhadap Faktor Reduksi Gempa (f_R) pada Kasus Timbunan diatas Tanah Keras S_C dan Tanah Sedang S_D , dengan $PBA=0,2g$



Gambar 13. Hubungan Tinggi Timbunan terhadap Faktor Reduksi Gempa (f_R) pada Kasus Timbunan diatas Tanah Lunak S_E , dengan $PBA=0,2g$

PEMBAHASAN

Kecenderungan secara umum terlihat bahwa semakin besar PBA maka angka keamanan akan menurun. Berdasarkan kelas tanah, semakin keras tanah terlihat semakin besar angka keamanannya. SF-Statik Ekuivalen menunjukkan nilai yang lebih kecil dibanding SF-dinamik minimum pada setiap kelas tanah dan PBA yang sama. Hal ini menunjukkan

bahwa analisis statik ekuivalen lebih konservatif dibanding analisis dinamik.

Dengan input motion *subduction*, SF dinamik minimum sedikit lebih besar dibanding SF dinamik minimum dengan input motion *strike-slip*, pada kasus yang sama. Hal ini menunjukkan mekanisme input motion tidak banyak berpengaruh terhadap nilai angka keamanan lereng (SF) baik pada analisis statik ekuivalen maupun analisis dinamik.

Kedalaman batuan dasar berpengaruh terhadap SF dinamik terutama pada tanah lunak. SF dinamik tanah lunak dengan $D=100\text{m}$ lebih kecil dibanding SF dinamik tanah lunak dengan $D=30\text{m}$ pada PBA yang sama. Hal ini terjadi karena pada tanah lunak dengan ketebalan lapisan yang besar, amplifikasinya akan lebih besar sehingga percepatan gempa di permukaan (PGA) menjadi lebih besar, dan pada akhirnya angka keamanannya menjadi lebih kecil.

Berdasarkan hasil pada Gambar 12 dan Gambar 13, untuk mendapatkan hasil seperti pada analisis dinamik, maka pada Analisis Statik Ekuivalen pada kasus timbunan ($H=4\text{m}-16\text{m}$) di atas tanah keras, direkomendasikan menggunakan faktor reduksi f_R antara 0,65 - 0,6. Untuk timbunan diatas tanah sedang, f_R berkisar 0,21 - 0,1 untuk ketinggian timbunan $H=4\text{m}-8\text{m}$. Pada timbunan diatas tanah lunak menghasilkan f_R antara 0,165 - 0,2 untuk timbunan $H=2\text{m}-6\text{m}$.

Sebagai perbandingan, hasil penelitian-penelitian sebelumnya tentang faktor reduksi gempa (Kramer, S.L., 1996): Terzaghi (1950) menggunakan k_h sebesar 0,1 - 0,5 dari gempa rendah sampai gempa besar. Seed (1979) menggunakan $k_h = 0,10 - 0,12$. Marcuson (1981) mengusulkan $k_h = 1/3 - 1/2$ dari maksimum percepatan gempa. Seed (1979) mengindikasikan bahwa deformasi pada konstruksi dam dengan percepatan kurang dari 0,75g bernilai cukup kecil dengan angka keamanan 1,15 menggunakan $k_h = 0,1$ ($M=6,5$) - 0,15 (8,25). Hynes-Griffin dan Franklin (1984), dengan angka keamanan $> 1,0$ digunakan $k_h = 0,5$

KESIMPULAN

Dari pembahasan tersebut dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut: SF-statik ekuivalen timbunan pada model dengan kedalaman batuan dasar $D=30\text{m}$ mempunyai nilai yang lebih besar dibanding dengan SF-statik ekuivalen timbunan pada model dengan kedalaman batuan dasar $D=100\text{m}$ dengan PBA dan klasifikasi site yang sama. Hasil penelitian dengan model tertentu (gambar. 1) dan $PBA=0,2g$ (*strike-slip*), untuk timbunan diatas

Tanah Keras S_C , direkomendasikan faktor reduksi f_R berkisar 0,62. Untuk timbunan diatas Tanah Sedang, S_D , f_R rekomendasi berkisar 0,2. Sedangkan pada timbunan diatas Tanah Lunak S_E , menghasilkan f_R berkisar 0,18.

Pada analisis ini tanah dianggap sebagai tanah lempung yang homogen, hal ini kenyataannya jarang ditemui di lapangan, sehingga untuk penerapan hasil analisis ini hanya sebagai pedoman dasar perencanaan. Selanjutnya untuk kasus tertentu di lapangan perlu dilakukan analisis yang lebih detail sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Brinkgreve, R.B.J et. Al, 1998, *PLAXIS Finite Element for Soil and Rock Analysis* ; Version 7 Dynamics, A.A. Balkema, Rotterdam.
2. Dakoulas, P., et. Al., 1998, “*Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*” ; Volume 2, University of Washington, Washington.
3. Hendarto, 2005, *Analisa Hazard Gempa Pulau Sumatera Menggunakan Probabilistic Seismic Hazard Analysis dengan Model Sumber Gempa 3 Dimensi* ,”Tesis Magister ITB, Bandung
4. Kramer, S.L., (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering* ; Prentice Hall inc Upper Saddle River, New Jersey.
5. Microsoft Corp., 1991, *Slope/W version 5 User's Guide* ; Geo-Slope International Ltd, Canada
6. Microsoft Corp., 1991, *Quake/W version 5 User's Guide* ; Geo-Slope International Ltd, Canada
7. Najjoan, Th. F., 1991, *Cara Sederhana Memperkirakan Alihan Tetap Akibat Gempa Bumi Untuk Bendungan Tipe Urugan* ,”JLP. No. 18 Th. 5-KW. III, Puslitbang Air, Bandung
8. Travasarou T, et. Al, 2004, “*A Probabilistic Methodology for Assessing Seismic Slope Displacements*” ; Paper No. 2326 13th WCEE, Vancouver, B.C.

